

С. Склепус

Ст. наук. співр., канд. фіз.-мат. наук,
Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
м. Харків

О. Золочевський

Ст. наук. співр., д-р техн. наук,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

Л. Пархоменко

Харківський державний університет
харчування та торгівлі,
м. Харків

УДК 539.3

НАПРУЖЕННЯ І ПОШКОДЖУВАНІСТЬ У ТВЕРДООКСИДНИХ ТРУБЧАСТИХ ПАЛИВНИХ КОМІРКАХ

Досліджено вплив явищ високотемпературної повзучості, температурного та хімічного розширення в електрохімічній кераміці на зростання пошкоджуваності та зниження часу безвідмовної роботи твердооксидних трубчастих паливних елементів.

твердооксидна трубчаста паливна комірка, повзучість, пошкоджуваність

Вступ. У сучасній техніці твердооксидні паливні комірки (Solid Oxide Fuel Cells – SOFC) є одними з найбільш ефективних енергогенеруючих систем, що конвертують хімічну енергію в електричну. Твердооксидні паливні комірки складаються з електроліту, катода і анода. Електроліт виготовлено з матеріалу, що проводить іони кисню. Шар електроліту укладено між двома тонкими пористими електродами (рис. 1). Катод, анод і електроліт виготовлено з керамічних матеріалів.

Теорія і технологія виробництва твердооксидних паливних комірок розвиваються та досліджуються досить недавно [1 – 3]. Однією з центральних проблем при проектуванні та експлуатації твердооксидних паливних комірок є забезпечення їх тривалої міцності та збільшення часу безвідмовної роботи. Для успішного розв'язання цієї проблеми потрібні знання фундаментальних законів температурних, електрохімічних та механічних процесів, що впливають на розподіл механічних напружень і зростання пошкоджуваності в часі. Абсолютні значення напружень, що виникають під час роботи в твердооксидних паливних комірках, залежать від властивостей матеріалів, експлуатаційних умов та геометричних параметрів конструкції.

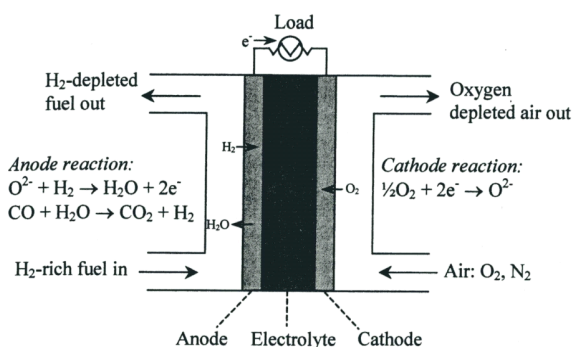


Рис. 1. Схема твердооксидної паливної комірки [1]

Температурні напруження виникають внаслідок температурних градієнтів та різниці між коефіцієнтами лінійного температурного розширення матеріалів сусідніх шарів.

Дослідження термопружних деформацій твердооксидних паливних комірок є важливою частиною структурного аналізу системи. Але цього недостатньо для розуміння механізмів деградації паливних комірок. Як правило, в

керамічних матеріалах спостерігається не тільки температурне розширення, а й хімічне, яке залежить від концентрації кисню і впливає на загальне розширення [4].

Також характерною властивістю керамічних матеріалів електроліту, анода й катода, що може призвести до зростання пошкоджуваності з часом, є повзучість. Кількість наукових праць, присвячених аналізу повзучості твердооксидних паливних комірок, є дуже незначною. До нашого часу в літературі так і не з'явилися дослідження взаємозв'язку між напруженнями, деформаціями повзучості та пошкоджуваністю в твердооксидних паливних комірках. Деформації повзучості змінюють мікроструктуру електроліту за рахунок дислокацій, атомів домішок та порожнин у початковій стадії повзучості, в подальшому – за рахунок межових мікроскопічних порожнин, а в фінальній стадії – за рахунок мікротріщин, з переважною орієнтацією, на межах зерен.

Математична постановка задачі та метод розв'язання. На рис. 2 зображено схему трубчастої паливної комірки, розробленої фірмою Siemens-Westinghouse [5], та її розміри в радіальному напрямі. Довжина електрохімічно активної частини $l = 1,5$ м. В якості розрахункової схеми паливної комірки візьмемо циліндричне тришарове тіло обертання скінченних розмірів $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$, віднесене до циліндричної системи координат $0rz\varphi$. Складові частини тіла V_1, V_2, V_3 жорстко зчеплені між собою. Вісь $0z$ збігається з віссю обертання циліндра. Меридіональний переріз тіла площиною $r0z$ має форму Ω з межею $\partial\Omega$. Область Ω є об'єднанням підобластей Ω_k ($k = 1, 2, 3$) з межами $\partial\Omega_k$. Тіло навантажене зовнішніми силами так, що шуканий розв'язок не залежить від кута φ .

Компоненти тензора швидкостей повних деформацій складаються з компонентів тензорів швидкостей пружних і температурних деформацій – $\varepsilon_{ij}^e, \varepsilon_{ij}^T$, компонентів тензора швидкостей деформацій, обумовлених хімічним розширенням ε_{ij}^{sw} , та компонентів тензора швидкостей незворотних деформацій повзучості p_{ij} :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}(r, z, t) = \dot{\varepsilon}_{ij}^e(r, z, t) + \dot{\varepsilon}_{ij}^T(r, z, t) + \dot{\varepsilon}_{ij}^{sw}(r, z, t) + \dot{p}_{ij}(r, z, t),$$

$$(i, j = \overline{1, 3}).$$

Тут крапка над символами означає повну похідну за часом, t – час.

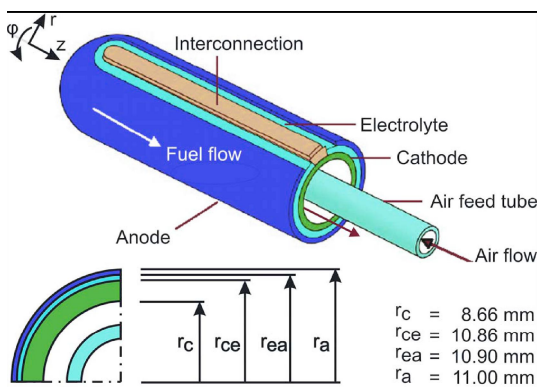


Рис. 2. Трубчаста паливна комірка

Температурні та хімічно обумовлені деформації обчислюються за формулами:

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}, \quad \varepsilon_{ij}^{sw} = A(C - C_0)\delta_{ij},$$

де $T = T(r, z, t)$ – температура, $C = C(r, z, t)$ – нестехіометрія кисню, $\alpha = \alpha(r)$, $A = A(r)$ – коефіцієнти лінійного температурного та хімічного розширення відповідно, T_0, C_0 – значення температури та нестехіометрії, за яких напруження відсутні, δ_{ij} – символ Кронекера. Вважаємо, що функції розподілу температури $T(r, z, t)$ та нестехіометрії кисню $C(r, z, t)$ відомі з розв'язку задач нестационарної теплопровідності та дифузії [6].

Визначальні співвідношення повзучості та кінетичні рівняння, що моделюють процес повзучості з урахуванням пошкоджуваності, в рамках теорії структурних параметрів Ю.Н. Работнова, в загальному випадку мають вигляд [7]:

$$\dot{p}_{ij} = f_{ij}(\sigma_e, \psi, q_1, q_2, \dots, q_N),$$

$$\dot{\omega} = g(\sigma_{e1}, \psi, q_1, q_2, \dots, q_N),$$

$$\dot{q}_k = g_k(\sigma_{ek}, \psi, q_1, q_2, \dots, q_N).$$

Тут σ_e – деяке еквівалентне напруження, ψ, q_i ($i = \overline{1, N}$) – скалярний параметр пошкоджуваності та структурні параметри стану.

Крайова задача повзучості, в довільний момент часу $t \neq 0$, може бути зведена до варіаційної проблеми знаходження мінімуму функціонала у формі Лагранжа, визначеного для кінематично можливих швидкостей переміщень:

$$\Lambda(\dot{u}_{ri}, \dot{u}_{zi}) = 0,5 \sum_{i=1}^3 \iint_{\Omega_i} [\lambda_1 (\dot{u}_{ri,r}^2 + \dot{u}_{zi,z}^2 + \dot{u}_{ri}^2 r^{-2}) +$$

$$+ G (\dot{u}_{ri,z} + \dot{u}_{zi,r})^2 +$$

$$+ 2\lambda (\dot{u}_{ri,r} \dot{u}_{zi,z} + \dot{u}_{ri} (\dot{u}_{ri,r} + \dot{u}_{zi,z}) r^{-1})] r dr dz -$$

$$- \sum_{i=1}^3 \iint_{\Omega_i} [\dot{u}_{ri,r} \dot{N}_r^f + \dot{u}_{zi,z} \dot{N}_z^f + \dot{u}_{ri} \dot{N}_\varphi^f r^{-1} +$$

$$+ \dot{N}_{rz}^f (\dot{u}_{ri,z} + \dot{u}_{zi,r})] r dr dz - \int_{\partial\Omega_p} (\dot{P}_n^0 \dot{u}_n + \dot{P}_\tau^0 \dot{u}_\tau) d\partial\Omega, \quad (1)$$

де $\dot{u}_{ri}(r, z, t), \dot{u}_{zi}(r, z, t)$ ($i = 1, 2, 3$) – швидкості переміщень у катоді, електроліті та аноді вздовж осей $0r$ та $0z$ відповідно; $\partial\Omega_p$ – частина контуру $\partial\Omega$, де діють зовнішні сили; $\dot{P}_n^0, \dot{P}_\tau^0$ – швидкості нормальної і дотичної складових зовнішніх поверхневих сил; $\mathbf{n}, \boldsymbol{\tau}$ – зовнішня нормаль і дотична до контуру $\partial\Omega$; $\dot{u}_n = \dot{u}_{rp} n_r + \dot{u}_{zp} n_z$, $\dot{u}_\tau = \dot{u}_{z\varphi} n_r - \dot{u}_{r\varphi} n_z$ – нормальна і тангенціальна складові вектора швидкостей переміщень на поверхні шару, де прикладено зовнішні навантаження; n_r, n_z – напрямні косинуси нормалі \mathbf{n} ;

$$\lambda(r) = \frac{E(r)v(r)}{(1-2\nu(r))(1+\nu(r))};$$

$\lambda_1(r) = \lambda(r) + 2G(r)$; $E(r)$, $G(r)$, $\nu(r)$ – пружні характеристики, які в кожному шарі є константами. Швидкості «фіктивних» зусиль, зумовлених деформаціями повзучості, а також температурними та хімічно обумовленими деформаціями, обчислюються за формулами:

$$\dot{N}_r^f = \left[\lambda_1 \dot{e}_r + \lambda (\dot{e}_z + \dot{e}_\varphi) \right], \quad \dot{N}_z^f = \left[\lambda_1 \dot{e}_z + \lambda (\dot{e}_r + \dot{e}_\varphi) \right],$$

$$\dot{N}_\varphi^f = \left[\lambda_1 \dot{e}_\varphi + \lambda (\dot{e}_r + \dot{e}_z) \right], \quad \dot{N}_{rz}^f = 2G \dot{e}_{rz},$$

де

$$\dot{e}_r = \dot{p}_r + \dot{\varepsilon}_r^T + \dot{\varepsilon}_r^{sw}, \quad \dot{e}_z = \dot{p}_z + \dot{\varepsilon}_z^T + \dot{\varepsilon}_z^{sw},$$

$$\dot{e}_\varphi = \dot{p}_\varphi + \dot{\varepsilon}_\varphi^T + \dot{\varepsilon}_\varphi^{sw}, \quad \dot{e}_{rz} = \dot{p}_{rz}.$$

Швидкості деформацій повзучості в функціоналі (1) вважаються заданими і не варіюються.

Основні невідомі задачі повзучості в довільній точці тіла можна знайти з розв'язку задачі Коші за часом [8]:

$$\frac{du_r}{dt} = \dot{u}_r, \quad \frac{du_z}{dt} = \dot{u}_z,$$

$$\frac{d\varepsilon_r}{dt} = \dot{\varepsilon}_{r,r}, \quad \frac{d\varepsilon_z}{dt} = \dot{\varepsilon}_{z,z}, \quad \frac{d\varepsilon_\varphi}{dt} = \frac{\dot{u}_r}{r}, \quad \frac{d\gamma_{rz}}{dt} = \dot{\varepsilon}_{r,z} + \dot{\varepsilon}_{z,r},$$

$$\frac{d\sigma_r}{dt} = \lambda (\dot{\varepsilon}_z + \dot{e}_\varphi - \dot{e}_z - \dot{e}_\varphi) + \lambda_1 (\dot{e}_r - \dot{e}_r),$$

$$\frac{d\sigma_z}{dt} = \lambda (\dot{e}_r + \dot{e}_\varphi - \dot{e}_r - \dot{e}_\varphi) + \lambda_1 (\dot{e}_z - \dot{e}_z),$$

$$\frac{d\sigma_\varphi}{dt} = \lambda (\dot{e}_r + \dot{e}_z - \dot{e}_r - \dot{e}_z) + \lambda_1 (\dot{e}_\varphi - \dot{e}_\varphi),$$

$$\frac{d\sigma_{rz}}{dt} = G (\dot{\gamma}_{rz} - 2\dot{e}_{rz}), \quad (2)$$

$$\frac{dp_r}{dt} = \dot{p}_r, \quad \frac{dp_z}{dt} = \dot{p}_z, \quad \frac{dp_\varphi}{dt} = \dot{p}_\varphi, \quad \frac{dp_{rz}}{dt} = \dot{p}_{rz}, \quad \frac{d\psi}{dt} = \dot{\psi}.$$

Початкові умови для невідомих функцій, у момент часу $t = 0$, знаходяться з розв'язку задачі пружного деформування. Відмітимо, що для розв'язання пружної задачі можна використати функціонал (1), в якому слід замінити швидкості функцій самими функціями.

Початкову задачу (2) будемо розв'язувати методом Рунге-Кутта-Мерсона з автоматичним вибором кроку [9]. Праві частини рівнянь (2), в моменти часу, що відповідають схемі Рунге-Кутта-Мерсона, обчислюються за допомогою розв'язування варіаційної задачі для функціонала (1). Варіаційну задачу будемо розв'язувати методом Рітца. При цьому координатні функції, у випадку якщо область Ω має складну геометричну форму, можуть бути побудовані методом R-функцій [10]. Метод R-функцій дозволяє точно враховувати геометричну форму та граничні умови самого загального виду. При цьому наближений розв'язок крайової задачі подається у вигляді формули – структури розв'язку, яка точно задовольняє усі або частину граничних умов і є інваріантною стосовно геометричної форми

Ω , області, де відшукується наближений розв'язок крайової задачі. Структура розв'язку є основою для побудови систем координатних функцій варіаційних методів.

Числові результати. Розглянемо повзучість циліндричної паливної комірки (див. рис. 2). Товщина катода $h_1 = 2,2 \cdot 10^{-3}$ м, електроліту й анода: $h_2 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ м, $h_3 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Катод виготовлений з матеріалу WPC3, електроліт і анод – з 8YSZ та Ni+YSZ відповідно [5]. Робоча температура $T = 900^\circ \text{C}$. Модулі Юнга та коефіцієнти Пуасона, для катода, електроліту й анода за температури 900°C [5, 11]: $E_1 = 58,0$ ГПа, $E_2 = 155,0$ ГПа, $E_3 = 64,0$ ГПа, $\nu_1 = 0,25$, $\nu_2 = 0,316$, $\nu_3 = 0,25$. Коефіцієнти лінійного температурного розширення: $\alpha_1 = 10,7 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_2 = 10,3 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_3 = 12,0 \cdot 10^{-6}$. Температура, за якої відсутні напруження, $T_0 = 1250^\circ \text{C}$. Хімічним розширенням будемо нехтувати. Зовнішні сили відсутні: $P_n^0 = 0$, $P_\tau^0 = 0$.

Матеріал катода, за існуючого рівня інтенсивності напружень, повзучості не виявляє. Закон одновимірної повзучості та кінетичне рівняння пошкоджуваності для електроліту й анода мають вигляд:

$$\dot{p} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t^{-k} \frac{\sigma^n}{(1-\psi)^n};$$

$$\frac{d\psi}{dt} = B \exp\left(-\frac{\Delta}{RT}\right) \frac{\sigma^m}{(1-\psi)^m}.$$

Тут $R = 0,0083144$ КДж·(моль·К)⁻¹ – універсальна газова стала, T – абсолютна температура. Константи повзучості електроліту [12]: $A = 704,5$ МПа⁻ⁿ·год⁻¹, $B = 1,1722$ МПа^{-m}·год⁻¹, $m = 1,7$, $n = 1$, $k = 0$, $Q = 320,0$ КДж·моль⁻¹, $\Delta = 44,23$ КДж·моль⁻¹. Константи повзучості анода [13]: $A = 9,145 \cdot 10^{-13}$ МПа⁻ⁿ·год⁻¹, $B = 0$, $m = 0$, $n = 7,181$, $k = 0,943$, $Q = 72,5$ КДж·моль⁻¹.

Визначальні співвідношення повзучості, в умовах складного напруженого стану, запишемо у вигляді:

$$\dot{p}_{kl} = \frac{3}{2} A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t^{-k} \frac{\sigma_i^{n-1}}{(1-\psi)^n} s_{kl};$$

$$\frac{d\psi}{dt} = B \exp\left(-\frac{\Delta}{RT}\right) \frac{\sigma_i^m}{(1-\psi)^m}.$$

Далі розглянемо умови закріплення, граничні умови та відповідні структури розв'язку. Бокові межі циліндра $r = r_c = 8,66 \cdot 10^{-3}$ м, $r = r_a = 11,0 \cdot 10^{-3}$ м вільні від закріплення та зовнішніх навантажень. Торці $z = \pm l/2$ паливного елемента можуть вільно переміщуватися вздовж осі $0z$.

При числовій реалізації будемо використовувати симетрію задачі. На осі симетрії, в перерізі $z = 0$, задаються такі умови:

$$\dot{u}_{zi} = 0, \quad \frac{\partial \dot{u}_{ri}}{\partial z} = 0 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (3)$$

Граничні умови на торцях циліндра, при $z = \pm l/2$:

$$\dot{\sigma}_z^{(i)}(\dot{u}_{ri}, \dot{u}_{zi}) = 0, \quad \dot{\sigma}_{rz}^{(i)}(\dot{u}_{ri}, \dot{u}_{zi}) = 0 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (4)$$

На внутрішній та зовнішній поверхнях циліндра, при $r = r_c$ та $r = r_a$:

$$\dot{\sigma}_r^{(i)}(\dot{u}_{ri}, \dot{u}_{zi}) = 0, \quad \dot{\sigma}_{rz}^{(i)}(\dot{u}_{ri}, \dot{u}_{zi}) = 0 \quad (i = 1, 3). \quad (5)$$

На межах шарів задаються умови жорсткого зчеплення:

$$\dot{u}_r^{(k)} = \dot{u}_r^{(k+1)}, \quad \dot{u}_z^{(k)} = \dot{u}_z^{(k+1)} \quad (k = 1, 2), \quad (6)$$

$$\dot{\sigma}_r^{(k)} = \dot{\sigma}_r^{(k+1)}, \quad \dot{\sigma}_{rz}^{(k)} = \dot{\sigma}_{rz}^{(k+1)}, \quad (7)$$

Умови (4), (5), (7) є природними для функціонала (1).

Структури розв'язку, що задовольняють кінематичні умови (3) та (6) можуть бути записані у вигляді:

$$\dot{u}_{ri} = \Phi_1 - \omega_0 D_1 \Phi_1 + \omega_i^2 \Phi_{ri},$$

$$\dot{u}_{zi} = \omega_0 \Phi_2 + \omega_i^2 \Phi_{zi}.$$

Тут $\omega_0 = z$, а ω_i ($i = 1, 2, 3$) – функції, що задовольняють умови [10]:

$$\omega_i = 0, \quad \text{на } \partial\Omega_i, \quad \omega_i > 0 \quad \text{в } \Omega_i,$$

де $D_1 = \frac{\partial \omega_0}{\partial r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial \omega_0}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z}$ – диференціальний оператор

[10], $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_{ri}, \Phi_{zi}$ ($i = 1, 2, 3$) – невизначені компоненти структури розв'язку, які при дискретизації крайової задачі подають у вигляді [10]

$$\Phi_i(\mathbf{x}) \approx \Phi_{iN}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^N C_k \Phi_k, \quad \mathbf{x} = (r, z),$$

де $\{\Phi_k\}$ – елементи деякого функціонального простору \mathbf{M} , який містить у собі Φ_i , що утворюють у ньому повну послідовність, C_k – невідомі коефіцієнти. Тут в якості

$\{\Phi_k\}$ використовувалися бікубічні сплайни Шенберга [10, 14]. Функції ω_i можуть бути задані так:

$$\omega_i = \omega_4 f_i,$$

де

$$\omega_4 = \frac{2z}{l} \left(\frac{l}{2} - z \right),$$

$$f_i = \frac{(r - r_i)(r_{i+1} - r)}{r_{i+1} - r_i},$$

$r_1 = r_c, r_2 = r_{ce}, r_3 = r_{ea}, r_4 = r_a$ (див. рис.2).

Системи сплайн-функцій будувалися на рівномірній прямокутній сітці. Спільні сплайни Φ_1, Φ_2 задавалися в усій області Ω , а системи сплайнів Φ_{ri}, Φ_{zi} ($i = 1, 2, 3$) – тільки у відповідних підобластях Ω_i .

У результаті розрахунків встановлено, що час до руйнування t_* складає 4360 год. Руйнування починається в шарі електроліту, в точках, що знаходяться на межі з анодом. На рис. 3 – рис. 5 наведені результати розрахунків напружень та пошкоджуваності в перерізі $z = 0$.

На рис. 3 показані результати для інтенсивності напружень у різні моменти часу. Для кращого подання результатів вздовж осі абсцис відкладено безрозмірну радіальну координату ρ , яка у відповідних шарах обчислювалася за формулою

$$\xi_n = \alpha_n \frac{r - r_{n-1}}{r_i - r_{n-1}} + \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k, \quad (n = 1, 2, 3),$$

де $r_0 = 8,66$ мм, $r_1 = 10,86$ мм, $r_2 = 10,9$ мм, $r_3 = 11,0$ мм; α_k – вагові коефіцієнти: $\alpha_0 = 0, \alpha_1 = 0,5, \alpha_2 = 0,18, \alpha_3 = 0,32$.

На рис. 4 зображено розподіл пошкоджуваності в шарі електроліту в різні моменти часу. На рис. 5 наведено графіки зростання пошкоджуваності з часом у різних точках електроліту.

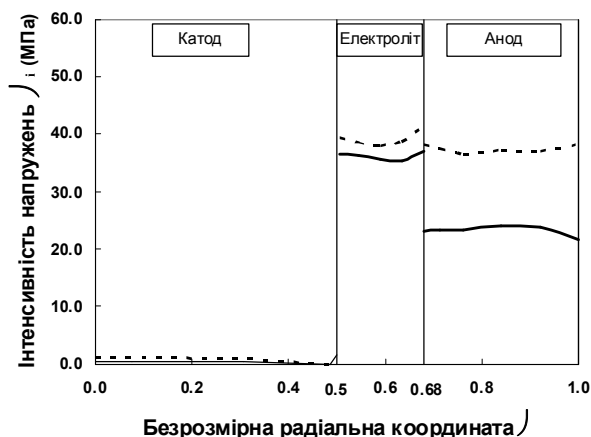


Рис. 3. Інтенсивність напружень в перерізі $z = 0$ в моменті часу: $t = 0$ (пунктирна лінія); $t_* = 4360$ год (суцільна лінія)

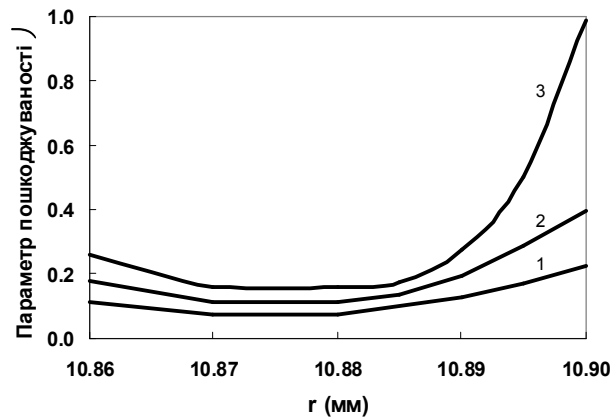


Рис. 4. Розподіл пошкодженості в електроліті в різні моменти часу: 1 – $t = 2000$ год, 2 – $t = 3000$ год, 3 – $t = t_* = 4360$ год

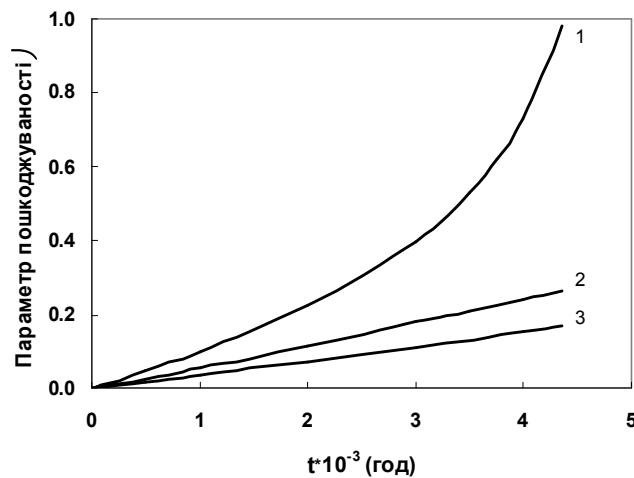


Рис. 5. Пошкодженість в електроліті: 1 – на межі електроліту та анода ($r = 10,8999$ мм); 2 – на межі електроліту та катода ($r = 10,8601$ мм); 3 – всередині електроліту ($r = 10,88$ мм)

Висновки. Під час роботи в твердооксидних паливних комірках, внаслідок повзучості, відбувається перерозподіл механічних напружень та накопичення пошкодженості. Рівень механічних напружень в електроліті й аноді, впродовж усього часу, залишається досить високим. Це призводить, в кінцевому підсумку, до руйнації паливної комірки. Для продовження терміну безвідмовної роботи паливних комірок потрібно добитися зниження рівня напружень, наприклад, за рахунок зменшення різниці між коефіцієнтами лінійного температурного розширення матеріалів сусідніх шарів.

Автори дякують Фонду цивільних досліджень та розвитку США (CRDF) за фінансову підтримку.

Література

1. *Bieberle-Hütter A., Beckel D., Infortuna A. et al.* A micro-solid oxide fuel cell system as battery replacement // *Journal of Power Sources.* – 2008. – 177. – P.123-130.

2. *Hotz N., Senn S.M., Poulidakos D.* Energy analysis of a solid oxide fuel cell micropowerplant // *Journal of Power Sources.* – 2006. – 158. – P.333-347.

3. *Joo J.H., Choi G.M.* Micro-solid oxide fuel cell using thick-film ceria // *Solid State Ionics.* – 2009. – 180. – P. 839-842.

4. *Vente J.F., McIntosh S., Haije W.G., Bouwmeester H. J. M.* Properties and performance of $Ba_x Sr_{1-x} Co_{0.8} Fe_{0.2} O_{3-\delta}$ materials for oxygen transport membranes // *J. Solid State Electrochem.* – 2006. – 10. – P. 581-588.

5. *Fisher K., Seume J.R.* Impact of the Temperature Profile on Thermal Stress in a tubular Solid Oxide Fuel Cell // *Journal of Fuel Cell Science and Technology.* – 2009. – Vol. 6. – P. 011017-1 - 011017-9.

6. *Crank J.* The Mathematics of Diffusion, Second Edition, Oxford University Press, Oxford. – 1999.

7. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

8. *Скленус С.* Розв'язання вісесиметричної задачі повзучості для тіл обертання із матеріалів з характерис-

тиками, що залежать від виду навантаження // *Машинознавство*. – 2007. – № 11. – С. 23-27.

9. *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП “Раско”, 1991. – 270 с.

10. *Рвачев В.Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с.

11. *Nakajo A., Stiller C., Hörkegerd G., Bolland O.* Modeling of thermal stresses and probability of survival of tubular SOFC // *Journal of Power Sources*. – 2006. – 158. – P. 287-294.

12. *Lowrie F.L., Rawlings R.D.* Room and high temperature failure mechanisms in solid oxide fuel cell electrolytes // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2000. – 20. – P. 751-760.

13. *Lara-Curzio E.* Durability and reliability of SOFC materials and components // *Proc. of 7th Annual SECA*

Workshop and Peer Review Philadelphia, PA September 12-14. – 2006.

14. *Федотова Е.А.* Практические указания по использованию сплайн-аппроксимации в программирующих системах серии “Поле” / Препринт – 202. – Харьков: ИПМаш АН УССР, 1984. – 59 с.

Отримана 25.05.09

S. Sklepus¹, A. Zolochovsky², L. Parkhomenko³

Stresses and damage in solid oxide tubular fuel cells

¹*Institute for Problems in Machinery NAS of Ukraine, Kharkiv;*

²*National Technical University “KhPI”, Kharkiv;*

³*Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv*

In this paper, a comprehensive theoretical and numerical investigation has been carried out with the main focus directed at the understanding on high temperature creep, thermal and chemical expansion in electrochemical ceramics affect creep damage growth and lifetime reduction for solid oxide tubular fuel cell systems.

Інформація

EUROMECH Colloquium 511

BIOMECHANICS OF HUMAN MOTION. NEW FRONTIERS OF MULTIBODY, TECHNIQUES FOR CLINICAL APPLICATIONS

Azores, Portugal, March 9-12 2011

<http://www.dem.ist.utl.pt/euromech511>

Colloquium Topics

- Biomechanical modelling
- Multibody formulations for biomechanics
- Finite element analysis in human motion
 - Kinematic and kinetic data acquisition
- Optimization in biomechanics of human motion
 - Musculoskeletal modelling
 - Stability analysis
 - Motor control
 - Contact mechanics in biomechanics
 - Human dynamics and rehabilitation

Contact Us

For any information regarding the conference please send a message to the Secretariat:

Ms. Paula Jorge

IDMEC Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais 1

Portugal

Fax: +351 21 841 7915

e-mail: euromech511(at)dem.ist.utl.pt